

버 관련기술의 이해와 그 추세

고 성 립

Understanding of Burr Technology and It's Trend

Sung-Lim Ko



- 고성립(대한중석(주)중앙연구소)
- 1957년생.
- 절삭가공을 전공하였으며, 절삭가공시의 버형성 원리와 절삭가공공정 및 버제거작업의 자동화, 그리고 절삭공구에 관심을 갖고 있다.

1. 머리말

일반적으로 버(burr)라 함은 가공후에 모서리에 발생하는 원치 않는 물체의 돌출된 부분으로 정의할 수 있으며 절삭가공이나 편칭작업 같은 소성 변형의 결과로써 나타나기도 하고 주조가공과 같은 경우에서도 발생한다. 어느 경우에서나 버의 존재가 원치 않는 모서리부에서의 형상이거나 더 구체적으로는 원치 않는 치수입을 생각하면 넓은 의미에서는 모서리부의 돌출뿐만 아니라 파단으로 인한 모서리도 버로 규정할 수 있다. 실제로 연성재질에서는 돌출한 버가 발생하지만 취성재질에서는 파단에 의한 모서리(chamfer)가 발생하기도 한다. 이 경우의 모서리면은 파단면으로 존재하기 때문에 거칠고 손상을 입기 쉬운 상태이기 때문에 역시 원치 않는 현상이라 할 수 있다.

일반적으로 일컫는 돌출된 형태의 버는 모서리부의 치수 변화로써 다음 공정에 지장을 주는 경우가 많다. 예를 들면 조립공정시 허용공차를 벗어날 경우에는 조립이 불가능하

며, 공차내에 있다 하더라도 접촉면의 손상을 가져와서 문제를 일으킬 여지가 많게 된다. 특히 소성변형으로 생긴 버는 가공경화로 인해서 더욱 경(硬)하고 불규칙적이어서 다른 부품의 손상과 작업자에게 손상을 일으키기 쉽다. 경우에 따라서는 다음 공정을 위한 치구에의 고정을 어렵게 하기도 한다. 그러므로 일단 발생된 버는 반드시 제거되어야 하며, 가능하면 버의 발생이 방지되거나 허용 가능한 최소한의 크기로 생성되도록 유도하는 것이 가장 바람직할 것이다.

최근 컴퓨터의 급속한 발전으로 생산 방식에서도 이와 함께 유연성있는 생산방식(FMS), 컴퓨터의 조합에 의한 생산방식(CIMS) 그리고 공장자동화(FA)와 같은 고도의 생산 방식의 발전이 있어 왔다. 이에 반하여 그 동안 생산자동화에 의한 공정시간 단축과 생산효율 증대에 따라 주로 사람의 손에 의하거나 간단한 전용기에 의존하던 버제거(deburring) 작업이 새로운 병목현상(bottle neck)으로 등장하기에 이르렀다. 이에 따라 최근에 버제거 작업의 자동화에 많은 관심이 모아지고, 또한 라인화를 위한 인

공지능(AI) 방식도 등장하고 있다. 피삭재의 재질과 발생 형태에 따른 각종 형태의 버를 다룰 수 있는 버제거 방식은 버가 갖는 다양성과 불규칙성으로 인해서 어려운 실정이다. 그 제품과 생산 방식에 맞는 전용의 버제거 방식이 개발되고 있다.

대부분의 제품은 부품의 조합으로 이루어져 있으며 제품의 성능은 각 부품의 성능과 부품 간의 공차 및 접촉 상태에 의해서 좌우된다. 이를 위해서 제품 설계시 재질, 열처리, 제품형태 및 치수 공차와 표면조도 등을 중요시하게 된다. 그러나 각 부품의 제작시 부수적으로 발생하는 불균일한 가장자리(edge) 상태 및 버에 관하여서는 설계시 무시당하는 사실은 실제 제품 제작중에 가장자리 처리를 위해서 쏟는 경비와 노력을 생각할 때 커다란 모순이 아닐 수 없다. 실제로 제품 수명이 이러한 가장자리 처리의 무시로 인해서 크게 줄어드는 경우가 많기 때문에 이러한 가장자리 처리에 관한 고려가 초기 설계시 설계요소로서 처리되어야만 한다.

2. 버의 분류

일반적으로 버형성 원리에 의해서 분류될 수 있으며 경우에 따라서는 형성 위치에 의

해서 분류되기도 한다. 사전적 의미에서의 버는 첫째, 절삭에 의한 금속 모서리의 거친 돌출 부분 둘째, 모서리의 돌출된 부분 셋째, 얇은 금속의 펀치작업 후에 생기는 돌출된 부분 등으로 정의되고 있다. 이것을 형성 원리에 따라서 크게 두 가지로 분류할 수가 있다.

○소성변형에 의해서 원하는 형상에 변화를 일으키는 부분

○성형시 작용하는 압력으로 인해서 유입된 부가적 돌출부분

전자의 경우를 주로 버라고 정의하고 그림 1(a)에서와 같은 일반적인 형태를 하고, 후자의 경우를 플래쉬(flash)로 정의하며 그림 1(b)에서와 같은 형상을 갖는다. 이 두 경우의 큰 차이점은 다음과 같다.

○버는 가공 경화에 의한 모재보다 훨씬 경한 성질을 가지며 소성가공의 특성상 항상 두면이 만나는 모서리에 발생한다.

○플래쉬의 경우는 모재와 동일한 성질을 가지며 때에 따라서는 모서리가 아닌 면의 가운데에 위치할 수도 있다.

두 경우 모두 원하는 형상을 얻는 데에는 저해가 되는 공통적인 특성을 가지고 있지만 이상과 같은 차이점으로 인해서 전자의 경우만을 기술적 의미에서의 버로 정의한다.⁽¹⁾

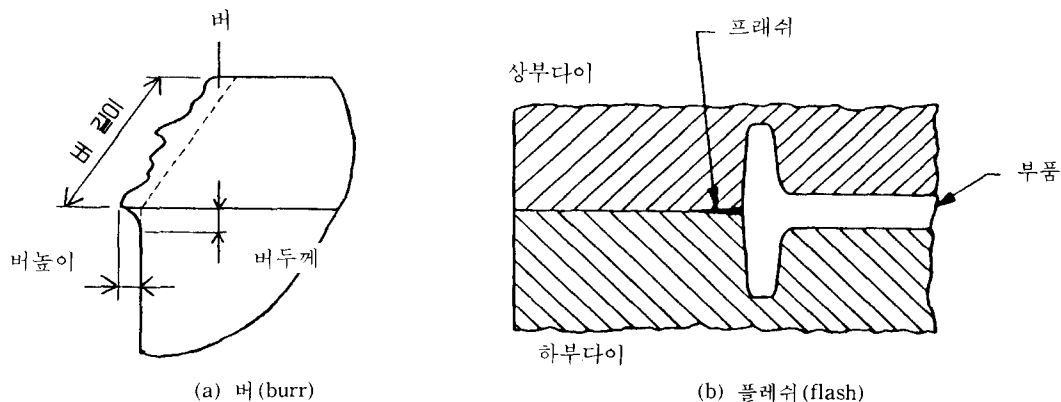


그림 1 버(burr)와 플래쉬(flash)의 일반적인 형상과 정의

소성변형에 의한 버형성은 칩발생에 의한 절삭 가공과 두 날의 간격을 이용한 전단 변형에 의한 절단작업인 편칭작업으로 크게 분류된다. 절삭 가공시에 발생하는 여러 형태의 버가 그림 2에 나타나 있다. 이들 대부분의 버는 발생위치에 따라서 공구 진행 방향의 피삭재의 이탈 지점에 발생하는 출구 버(exit burr), 진입지점에 발생하는 입구 버(entrance burr), 공구 진행시 측면에 발생하는 측면 버(side burr) 그리고 공구 이송 방향의 피삭재 이탈 지점에 발생하는 기울림 버(leaned burr)로 구분된다.⁽²⁾ 여기서 공구 진행 방향에 따른 버 발생 방향에 따라서 출구 버는 항상 진행방향으로 발생하는 전향 버(forward burr)로 입구 버는 반대 방향으로 발생하는 후향 버(backward burr)로 구분되기도 한다. 이것을 버 형성원리에 의해서 다음의 세 가지로 구분할 수 있다.

3. 버 형성 원리에 의한 분류

3.1 롤오버 버

가장 일반적인 버의 형태로서 절삭날이 피삭재를 빠져나올 때 끝부분에서의 칩의 일부가 전단변형과 굽힘변형에 의해 공구진행 방향으로 돌출하여 발생한다. 2차원절삭에서는 그림 2(a)의 버 'A'와 같이 발생하지만 실제 3차원절삭에서는 여러 형태의 버가 그림 2의 'E'와 'F'와 같이 복합적으로 나타난다. 정상상태(steady state)에서의 2차원 절삭시 칩형성은 피삭재의 끝부분으로 공구가 접근할수록 전단변형에 의한 칩형성이 전단 변형과 굽힘변형의 비의 변화로서 버가 형성되어간다. 측면으로의 칩흐름이 없는 평면변형(plain strain)의 가정하에서 그림 3(a)에서와 같이 버가 형성되어 그림 1(a)와 같은 최종적인 형상을 갖는다. 그림 3(b)에서 정상적인 칩형성이 끝나는 지점, A에서부터 버형성이 시작하는 가정이 도식화되어 있다. 그림 3(a)에서의 버 형성의 관찰을 근거로

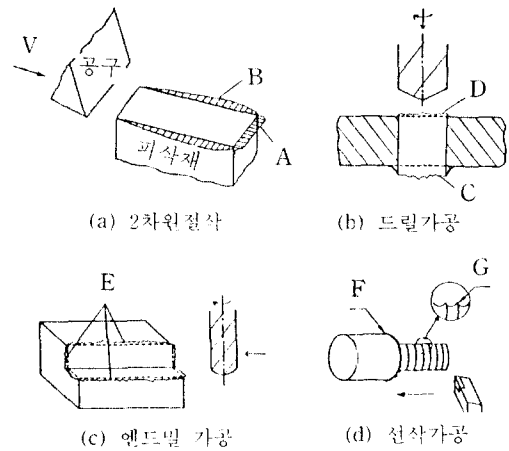
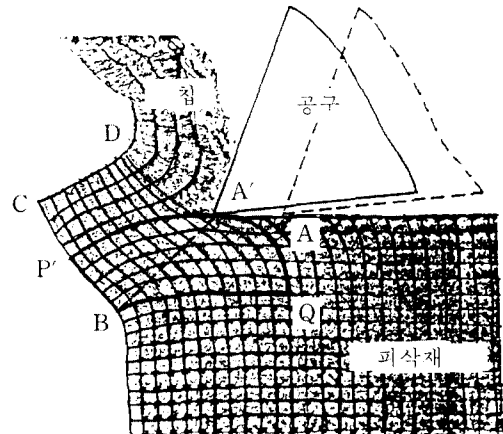
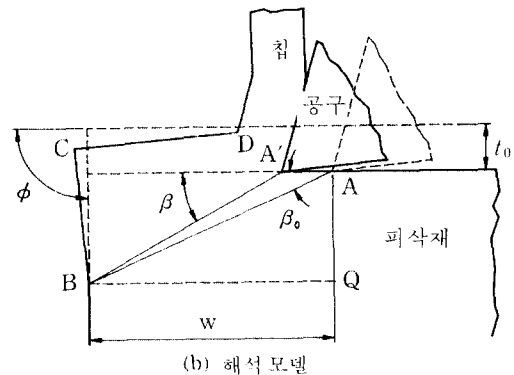


그림 2 금속절삭에서의 여러 형태의 버형성



(a) 관찰



(b) 해석 모델

그림 3 2차원절삭에서의 롤오버 버(rollover burr)

버 형성시의 변형은 피삭재의 ABC가 A'BC로 변형이 되면서 전단변형과 굽힘변형의 복합적 형태로 이루어진다고 가정하였다. 칩형성에 사용되는 에너지가 모두 버 형성에 사용된다는 가정에 의해서 버의 높이(h_o)와 두께(h_f)가 다음과 같은 정량적인 모델로서 제시되었다.⁽³⁾

$$h_o = \omega \tan \beta_o \quad (1)$$

$$h_f = (t_o + \omega \tan \beta_o) \sin(90 - \beta_o) \quad (2)$$

여기서, ω 와 β_o 값은 초기 버 형성을 규정하는 중요한 요소로서 그림 3(b)에서 칩형성이 끝나고 버형성이 시작하는 전환점, A,에서의 피삭재 끝면으로부터의 공구의 거리(initial tool distance)와 소성한지점, B와 이루는 초기음의 전단각(initial negative shear angle)을 의미한다. β_o 의 값은 전환점 A에서의 버 형성에 소요되는 에너지의 최소화를 만족하는 값으로서 이론치와 실제측정값이 그림 4에서 피삭재의 끝면과 공구이탈 방향으로 정의되는 공구 이탈각도, ϕ 에 따라 나타나 있다. 이것에 의하면 이론치가 실험치보다 약간 작은값을 갖는데, 실험치가 피삭재와 절삭조건에 관계없이 일정한 값을 갖는 사실은 이미 이론식으로부터 예측된 사실이다. 이 실험값을 사용하면 이탈 각도

90°의 피삭재의 경우 피삭재에 관계없이 초기음의 전단각은 항상 약 20°임을 알 수 있다. 초기 공구 위치, ω 는 전환점 A에서의 칩형성에 사용되는 에너지가 모두 버 형성에 사용된다는 가정하에서 구해졌는데 실제 이 에너지의 전환비(r_e)는 피삭재의 성질에 따라 큰 차이를 나타낸다. 실제 초기 공구 위치(ω')는 초기 공구 위치의 예측치와 에너지 전환비의 곱으로 ($\omega' = r_e \omega$) 나타낼 수 있다. 여기에서 ω 는 이론치이고 에너지 전환

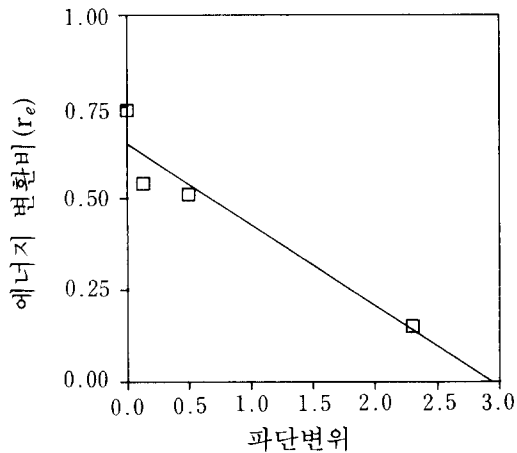


그림 5 과단변위(ϵ_f)에 따른 에너지 변환비(r_e)

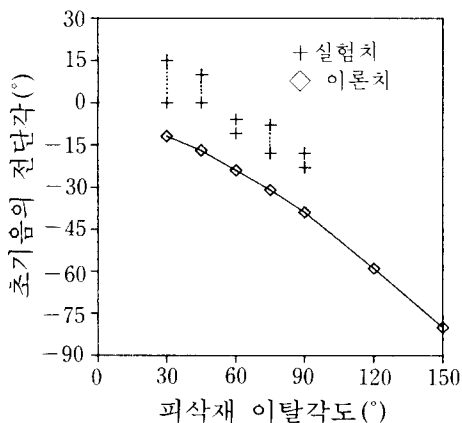


그림 4 초기음의 전단각(β_o)의 이론치와 측정치

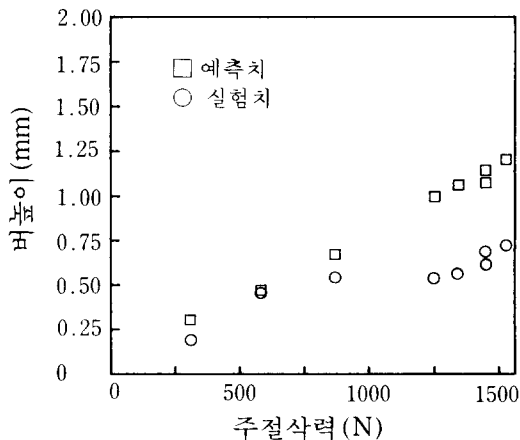


그림 6 구리(copper)에서의 버형성의 비교

비, r_e 는 $\omega_{meas}/\omega_{pred}$ 으로서 ω_{meas} 는 주사전자현미경(scanning electron microscope)내에서의 2차원 절삭을 관찰함으로써 얻으며 ω_{pred} 는 이론식에 의해서 얻어진다. 이렇게 실험적으로 얻은 r_e 의 값은 피삭재의 연성(ductility)에 따라 일관성 있게 그림 5와 같이 변한다는 사실이 밝혀졌다.⁽⁴⁾ 피삭재의 연성을 나타내기 위하여 인장시험으로부터 구한 파단변위, ϵ_f 가 사용되었다.

이상의 실험치에 의존한 정량적인 모델에 의해서 예측된 버의 크기가 그림 6에서 측정치와 비교되었다. 대부분 양호한 예측이 이루어지고 있지만 주절삭력이 1200N 이상에서의 약 70~80%의 오차도 버형성의 복잡성을 고려할 때 인정할 수 있는 값이라고 여겨진다.

정량적인 모델로부터 절삭저항이 클수록 버의 크기가 커진다는 사실을 예측할 수 있으므로 절삭저항을 크게 하는 모든 요소는 버의 크기를 증가시킨다. 절삭깊이의 증가, 공구경사각의 감소 및 경사면에서의 마찰증가는 버의 크기를 증가시킨다. 절삭속도의 증가가 절삭저항의 감소를 초래함이 적정영역에서는 인정되므로 버의 크기를 감소시키는 요인이 된다. 피삭재 물성치의 영향으로써 가공경화가 심한재질에서는 변형이 증가할수록 절삭저항이 커지므로 버의 크기 역시 증가한다. 또한 연성(ductility)이 클수록 버형성을 위한 허용 소성변형량이 커지므로 버의 크기가 증가한다. 취성재질의 경우 소성변형의 초기단계에 파단이 발생한 모서리(chamfer)가 생기며 그 크기는 재질의 파단변위의 크기에 의해서 결정된다.⁽⁴⁾

3.2 포아손 버

포아손 버(Poisson burr)는 절삭시 공구 진행 방향의 직각방향으로의 피삭재의 소성변형에 의해서 발생한다. 이것은 힘이 가해진 방향의 변형량과 직각 방향으로의 변형량의 비로 나타내어지는 포아손 비(Poisson

ratio)에서 그 이름이 유래되었다고 볼 수 있다. 흔히 그림 2(a)에 나타난 측면 버(side burr)가 포아손 버로 이해되고 있다. 이것은 측면 버(side burr)는 항상 공구 진행방향의 직각방향으로 발생하기 때문이다.

Gillespie는 절삭 가공에서의 포아손 버(Poisson burr)를 세 가지 경우로 구분하였는데 첫째는 절삭 깊이가 공구인선 반경보다 훨씬 큰 경우로서 절삭상태를 공구가 피삭재 내에 그림 7과 같이 반경이 r 인 긴원통을 내압이 p 인 상태로 압입한 상태로 가정함으로써 포아손 버의 형성을 소성이론을 이용하여 구하였다.⁽⁵⁾ 여기에서 원통 반경 r 은 공구인선 반경으로 가정하였고 압입력 p 는 절삭시 공구이송방향의 절삭분력으로 가정하여 완전소성물체에서의 거동을 Nadai의 이론을 이용하여 버의 크기를 정량화하였다. 이 모델에 의한 버의 크기는 측정치보다 약 1/50에 미치고 있어서 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 이것은 실제의 유효공구인선 반경 r 이 구성인선으로 인해서 크게 증가하며 또한 공구 여유면의 피삭재와의 접촉으로 인하여도 증가하는 사실에 의해서 오차의 일부가 발생한다고 볼 수 있다. 두번째 경우는 절삭 깊이가 공구인선 반경에 비하여 작아서 공구 여유면과의 접촉으로 인한 공구이송방향의 분력이 큰 경우이다. 이 경우는 첫번째 경우와 같은 원통의 압입 상태를 가정할 수가 없

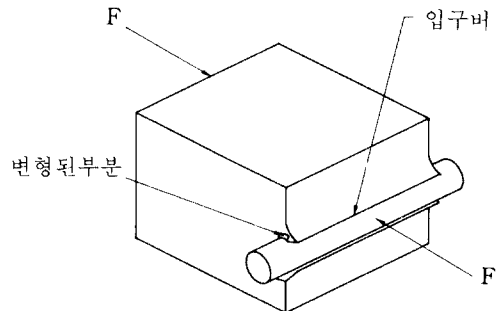


그림 7 Gillespie에 의한 포아손 버(Poisson burr) 모델

다. 세번째는 그림 7에서 나타난 바와 같이 공구의 진입단계에 공구진행 방향의 반대 방향으로 형성되는 입구 버(entrance burr)의 경우이다. 이 경우는 강구의 압입이나 웨지(wedge) 압입의 경우로 쉽게 가정할 수 있다. 이러한 형태의 버는 다른 종류에 비해서 크기가 작아서 실제로 분쇄가 되는 경우는 드물다.

이상의 포아손 버(Poisson burr)의 크기는 실제 측면 버(side burr)의 측정치에 크게 못 미치고 있다. 이것은 버형성을 위한 소성 변형이 공구이송방향의 절삭분력에 의한 변형에만 관계하는 것이 아니고 그림 8에 나타난 것처럼 칩형성시 인선 앞에 있는 피삭재의 칩형성시 공구인선에 평행한 방향으로

의 유동에도 크게 의존하고 있기 때문이다.⁽²⁾ 첫번째 경우(Type I)는 칩형성이 평면변형(plane strain)의 상태에서 이루어지지만 두번째(Type II)와 세번째(Type III)의 경우는 측면 모서리 부근에서 평면응력(plane stress) 상태로의 전환이 이루어져서 측면 모서리 부근의 피삭재가 측면 버의 형태로 남겨진다. 이것은 공구경사각(γ)의 크기가 감소함에 따라 칩의 전단면에서의 변형량이 증가함으로 이루어진다. 이렇게 발생된 버의 크기는 앞에서의 포아손 버보다 훨씬 크며 실제의 버의 크기를 결정한다. 그림 9에서는 공구경사각의 감소에 따라 칩의 전단변형도 γ_s 의 증가에 의한 측면 버의 크기가 나타나 있다. 영역-1에서는 전단변형도가 $\gamma_s < 3$

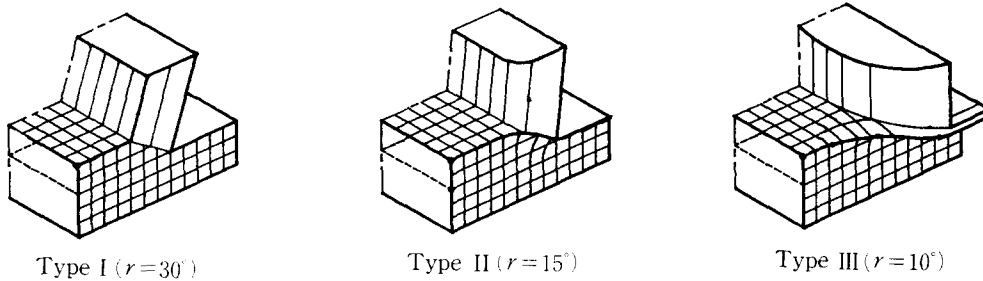


그림 8 공구 경사각(γ)의 변화에 따른 측면버(side burr) 형성의 변화

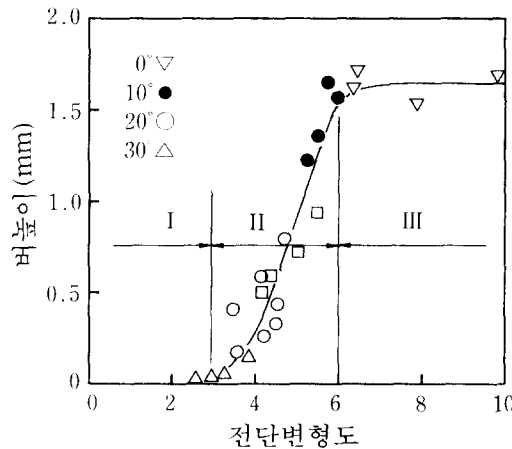


그림 9 칩의 전단변형도에 따른 측면버의 크기 변화

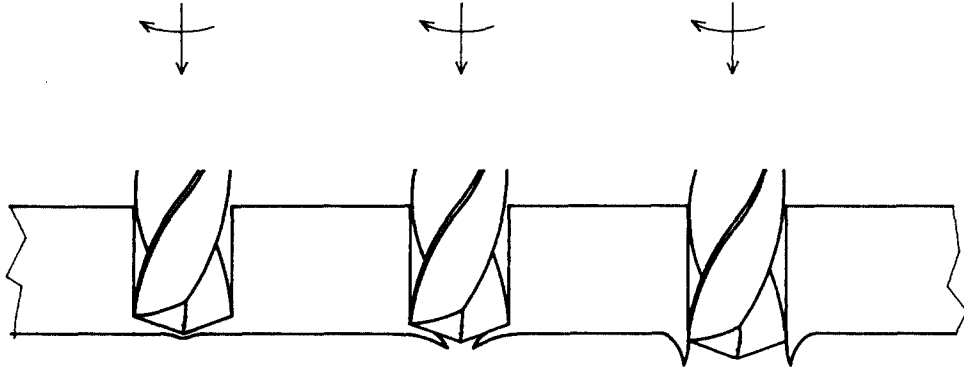


그림 10 드릴작업에서의 기울림 버(leaned burr)의 형성

인 경우로서 무시할 만한 크기의 버가 발생한다. 이 경우에는 앞에서 소개된 순수 포아손 버가 주를 이룰 것으로 사료된다. 이것으로부터 Gillespie가 제시한 모델은 평면변형(plane strain) 상태의 절삭에서 적용된다고 볼 수 있다. 이에 반하여 영역-III에서는 일정한 크기의 큰 버가 형성되었는데 평면응력 상태의 변형의 결과로 유추할 수 있다. 그러므로 측면 버의 크기를 줄이기 위해서는 경사각의 증가에 의한 칩의 전단변형도의 감소에 의해서 가능하며 물론 절삭 깊이의 감소에 의해서 가능하다. 공구 앞부분의 칩의 공구인선에 평행한 방향으로의 유동에 의한 측면 버의 발생은 그림 2(a)의 'B'와 같은 2차원절삭이나 그림 2(c)의 'E'와 같이 복합적인 형태나 선삭에서의 버 'F'와 같이 발생하지만 버 'G'와 같이 공구의 매이송마다 이상적인 이송자국 위에 돌출되는 미세한 버도 끝부분에서의 피삭재의 유동이 같은 원리로 발생되며 이것은 절삭가공면의 표면조도를 저해하는 주요 원인이 되기 때문에 앞으로 흥미있는 연구과제가 될 것이다.

3.3 기울림 버

기울림 버(leaned burr)는 평면밀링이나 드릴 작업에서처럼 피삭재의 공구이송 방향의 끝부분에서 그림 10에서와 같은 거동에 의

해서 발생한다. 롤오버 버(rollover burr)의 경우에는 공구진행 방향의 절삭력의 크기에 지배를 받는 반면 이 경우에는 이송방향의 절삭력에 의해서 그 크기가 결정되는 점에서 차이가 있다. 다음 절삭시에 제거될 부분이 이송방향의 힘에 의해서 굽힘이 일어나서 절삭되지 아니하고 밀려서 버로 남게 된다. 이 경우의 버의 높이는 대체로 절삭 깊이보다 작은 것이 보통이다. 공구의 리드각(lead angle)과 피삭재의 강성에 의해서 버가 쉽게 제거되기도 한다. 드릴에서는 선단각의 크기에 따라서 버의 형태와 크기가 변하기 때문에 드릴 설계시 중요한 설계요소로서 취급되고 있다.

4. 버 형성의 최소화를 위한 방안

절삭가공에서의 버의 형성은 어느 정도의 차이는 있지만 필연적으로 발생하기 때문에 필요에 따라서는 버제거 작업 또한 필수적으로 이루어져야 하는 경우가 많다. 이에 따른 버제거 작업경비의 최소화가 산업현장에서는 생산원가 절감을 위한 당면과제가 되고 있다. 버제거 경비의 최소화를 위해서는 크게 세 가지의 접근방법이 제기된다.

- 버형성의 방지 및 최소화
- 적정 버제거 방법의 선택

○버제거 작업공정의 효율화 및 자동화 실시

여기서는 가장 기본적인 접근방법인 버형성의 최소화를 위한 방안에 대해서 다루어지며 적절한 버제거에 의한 방법은 피삭재의 성질 및 규격, 그리고 작업방법에 따른 장비의 도입이 필요하므로 달리 구분하고자 한다. 절삭가공에서 버형성 최소화를 위한 방법은 절삭에 관련된 모든 사항과 관련이 있으며 이것을 다음과 같이 구분 할 수 있다.

- 피삭재의 형상을 이용한 방법
- 피삭재의 성질을 이용한 방법
- 공정순서 변경에 의한 버형성 위치를 변경
- 적정 공구형상의 설계에 의한 방법
- 절삭조건에의 적절한 선택에 의한 방법

첫째, 피삭재의 형상을 이용한 방법은 앞에서 그림 4에 나타난 것처럼, 피삭재의 이탈각도가 30°부근에서 초기음의 전단각(initial negative shear angle)이 '0'에 가까운 값을 가지기 때문에 식 (1)에 의하면 가공 후의 피삭재 내의 버형성에 의한 소성영역이 없어서 버가 발생하지 않는다. 그림 11에서 충분히 연성이 있는 재질에서의 피삭재 이탈각도(ϕ)의 증가에 따른 롤오버 버(rollover burr)의 크기의 증가가 잘 나타나 있다. 이것이 비록 롤오버 버에 관한 것이지만 다른 종류의 버에 있어서도 같은 현상을 쉽게 발견할 수 있다. 이 사실을 이용한 그림 12의 'A'부분에서 버 발생 예상부분의 모떼기 작업(chamfering)을 가공 전에 함으로써 버 발생을 방지할 수 있다. 이것은 모떼기 공정의 증가를 의미하지만 가공 후 버제거공정에 비하면 훨씬 용이한 작업이다. 공정순서의 변경에 의해서 생산성의 증가를 기대할 수 있는 좋은 예로 여겨지며 대부분의 경우 버발생 방지를 위해 우선적으로 손쉽게 행할 수 있는 방법이다.

둘째, 피삭재의 성질을 이용하는 방법으로서는 특히 연성(ductility)과 가공경화성(strain

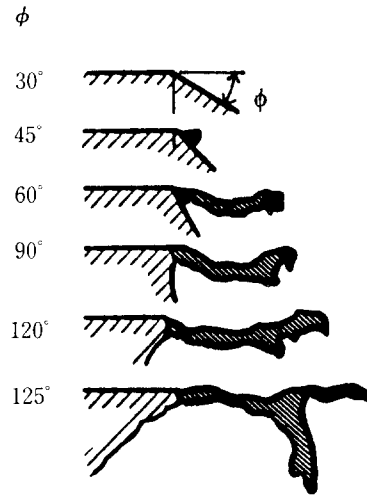


그림 11 공구의 피삭재 이탈각에 따른 롤오버 버의 크기의 변화

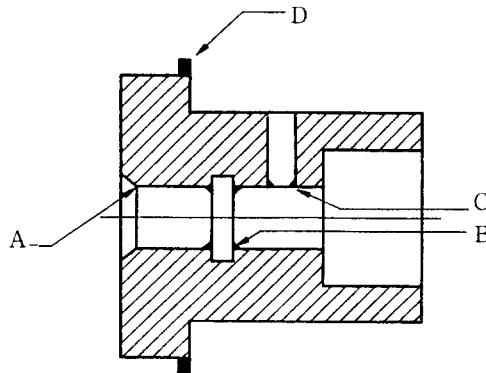


그림 12 기계부품 가공에 있어서 버형성에

- A: 사전 모떼기작업에 의한 버 발생 방지
- B: 내경 홈가공에 의해서 발생된 버
- C: 두개의 구멍작업에서 발생된 버
- D: 외경 선삭작업에 의해서 발생된 버

hardening)의 변화를 줌으로써 버의 형성을 최소화할 수 있다. 버 발생 억제가 가공중에 가장 중요한 문제라면 취성을 갖는 피삭재로 변경하거나 열처리를 통해서 원하는 정도의 연성을 얻을 수는 있지만 대부분의 경우 기계요소로서 갖추어야 하는 강도와 연성이 우선적으로 고려되어야 하기 때문에 전반적으로 연성의 변화를 주기는 어렵다. 그래서 국

부적인 부분 즉, 버 발생 예상부분만의 연성을 변화시키기 위한 방법들이 제시되고 있다. 고주파 전류에 의한 원하는 부분의 표면 열처리에 의해서 공구가 지나갈 부분만을 경화시킴으로써 버 발생을 줄일 수 있다. 물론 버발생 억제를 위한 이같은 공정의 중요성은 일반가공 후 버제거를 위한 경비와 버제거의 난이성을 검토한 후에 결정되어야 한다. 그림 12에서 내경부의 홈가공 후에 발생하는 버 'B'는 제거하기가 매우 어렵다. 만약 홈부의 버가 내경허용공차를 벗어난다면 이부분의 표면강화에 의한 작업이 필요하다.

셋째, 가공 공정 순서를 변경함으로써 버의 위치가 변하는데 버의 존재가 허용되는 방향으로 유도하거나 모두 허용이 되지 않는 경우에는 버제거가 용이한 방향으로 유도되어야 한다. 그림 12에서 두 개의 구멍이 만나는 부분에 발생하는 버 'C'는 가공순서의 변경에 의해서 위치가 큰 구멍 쪽으로 발생할 수도 있다. 예를 들어서 오일 주입구의 경우처럼 작은 구멍의 허용공차가 버의 존재를 허용하는 경우에는 'C'의 위치로 유도하는 것이 바람직하다. 외경부에 존재하는 버 'D'도 작업순서 변경에 의해서 방향을 바꿀 수도 있지만 버의 존재를 허용하는 방향으로 유도하거나 제거하기 쉬운 방향으로 유도가 가능하다. 이와 같은 일련의 작업은 현장작업자의 임의성에 의존하는 것보다 설계자와 현장 기술자의 협조에 의해서 도면상에 표시되는 것이 바람직하다.

넷째, 공구의 적절한 형상 설계에 의해서

도 버가 완전히 제거되거나 최소화될 수 있다. 이 경우에는 공구의 형상이 일체형을 갖는 총형공구(form tool)가 대부분이다. 내경부의 홈가공시에는 그림 12에서 버 'B'의 경우와 같이 발생하여 부품 조립시 내경공차의 변화를 초래한다. 이와 같은 경우에는 그림 13과 같이 가공할 홈과 버발생이 예측되는 내경부의 형상을 일체형으로 갖는 총형공구를 사용함으로써 버를 제거할 수 있다. 또 다른 좋은 예로서 나사 가공시 앞에서 소개한 공구의 이송으로 인한 측면 버의 원리로서 발생하는 버가 그림 14에 소개된 것처럼 나사산과 골의 일체형을 갖는 나사용 총형공구를 사용함으로써 버를 제거할 수 있다. 이 경우에도 설계자와 공구 제조업자와의 충분한 의견교환에 의해서 이와 같은 총형공구의 설계가 가능하다. 마지막으로 절삭조건에 의해 버의 크기를 조절할 수 있다. 대부분의 경우 절삭저항을 증가시키는 요인이 버의 크기를 증가시킨다는 사실이 앞에서 언급되었다. 이는 절삭저항의 증가는 버 형성시 소성영역이 커짐으로써 그 결과 버의 크기가 증가하는 것으로 이해된다. 절삭깊이의 증가, 이송량의 증가, 공구의 경사각의 감소, 절삭속도의 감소 등이 버의 크기를 증가시키는 요인으로 들 수 있다. 그림 12에서 버 'C'의 경우 만약 버의 크기가 양쪽 구멍에서 모두 허용이 되지 않는 경우 특수한 방법 이외에는 버의 제거가 어렵다. 이 경우 구멍가공을 황삭과 정삭으로 구분하여 황삭시 발생된 큰 버가 정삭시 제거되면서 정삭의 작은 절삭깊

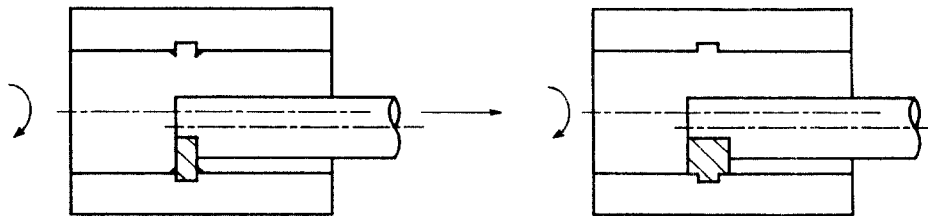


그림 13 총형공구(form tool)에 의한 내경홈에서의 버발생 억제 예

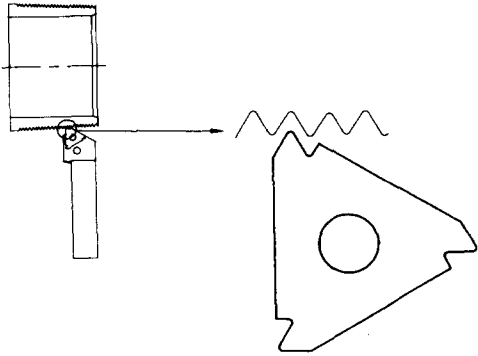


그림 14 나사가공시 버발생 방지를 위한 나선전용
총형공구

이와 이송량으로 인해서 최소한의 작은 버로 유도할 수 있다. 절삭조건은 생산성과 밀접하게 연결되기 때문에 버의 크기를 절삭조건에 의해서 최소화할 것인지 별도의 버 제거 작업을 실시할 것인지에 대해서는 기술자가 판단하여야 할 것이다.

5. 버 제거 작업

일단 절삭가공에서 버가 형성되면 그것을 용이하게 그리고 경제적으로 제거하는 것이 바람직하다. 버를 용이하게 제거하기 위해서는 앞에서 언급한대로 크기가 최소화되어야 하고 공정순서를 조정함으로써 버의 형성 위치를 제거하기 쉬운 위치로 옮겨야 한다. 버 제거작업은 가공물의 크기와 성질 그리고 가공조건에 의해서 결정되는 버의 크기와 위치에 의해서 결정되기 때문에 매우 다양하다. 이와 같이 다양한 작업을 Gillespie가 많은 비행기 제작업체를 중심으로 그 동안의 방대한 자료를 최초로 집대성하였다.⁽¹⁶⁾ 주된 버 제거원리에 의해서 표 1에서 버 제거작업이 분류되어 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

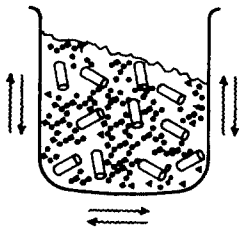
- 연마제를 이용한 버제거(abrasive deburring)

- 기계적 공구를 이용한 버제거(mechanical deburring)
- 열을 이용한 버제거(thermal deburring)
- 전기를 이용한 버제거(electrical deburring)
- 화학물질에 의한 버제거(chemical deburring)

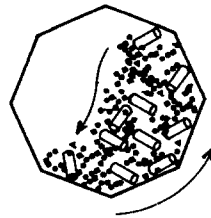
연마제에 의한 버제거 작업은 가공물의 크기와 버의 위치에 따라 연마제의 크기와 속도가 결정된다. 소형 가공물의 외측에 버가 존재할 때에는 그림 15(a)와 같은 진동에 의한 버제거(vibratory deburring)이나 (b)의 베럴의 회전에 의한 버제거(barrel tumbling)를 이용하고 기어나 크랭크샤프트의 경우는 회전축을 이용한 (c)와 같은 버제거 방법(spindle finishing)이 적합하다. 버가 가공물의 내부에 존재할 때에는 연마제의 내부주입에 의한 버제거 방법(flow finishing)에 의한다. 압출연마기(extrude hone machine)가 그 대표적인 예다. 최근에는 연마제 분사에 의한 버제거(abrasive jet deburring)가 소개되어 고속의 연마입자가 분사되어 버를 제거한다. 기계적 버제거 작업으로는 수작업, 브러쉬를 이용한 작업, 그리고 기계적 장비를 이용한 작업이 있다. 이 경우에는 버 제거작업이 버가 발생한 모서리를 따라 움직이기 때문에 기계장치에 의한 모서리부의 추적능력이 가장 큰 문제로 제기된다. 브러쉬를 이용한 작업은 브러쉬의 강성으로 인해서 연한 재질의 작은 버에만 국한된다. 수작업을 위한 장비로는 수동연마기가 주로 사용되는데 연삭휠이나 버 제거용 전용공구(bur)를 사용한다. 기계적 장비를 이용하는 경우에는 주로 버제거전용 CNC장비나 산업용 로봇이 사용된다. 이들은 모서리부의 추적능력이 있으므로 버 제거작업의 자동화에 사용될 수 있다. 그러나 버가 갖는 강성과 모서리부의 접근의 용이성 및 정도에 따라서 아직 많은 제한을 갖고 있기 때문에 많은 연구가 진행중에 있다. 토치나 플라즈마를 이용하여 버를

표 1 주요 버제거공정의 원리와 종류

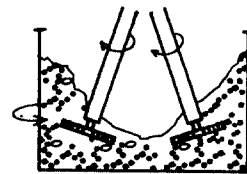
버제거 원리	버제거 방법	복합적 방법
연마제 이용	<ul style="list-style-type: none"> ○진동에 의한 연마 ○베럴회전에 의한 연마 ○스핀들 회전에 의한 연마 ○원심력을 이용한 베럴연마 ○자장에 의한 연마 ○왕복운동에 의한 연마 ○연마제의 흐름에 의한 연마 	<ul style="list-style-type: none"> ○샌팅 (sanding) ○연마제 고속분사 (abrasive jet deburring)
기계적 방법	<ul style="list-style-type: none"> ○수작업에 의한 모따기 ○브러싱 (brushing) ○장비를 이용한 모서리 절삭(robot deburring) 	
열적 방법	<ul style="list-style-type: none"> ○불꽃에 의한 모서리 용융 ○폭발에 의한 열충격 이용 ○열선에 의한 모서리 용융 	
화학적 방법	<ul style="list-style-type: none"> ○용액 내에서 에칭 ○연마제와 함께 사용하는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> ○전해액을 이용한 방법 (electro chemical deburring)
전기적 방법	<ul style="list-style-type: none"> ○전기저항, 스파크로 용융 ○연마제와 함께 사용하는 방법 	



(a) 진동에 의한 연마



(b) 베럴회전에 의한 연마



(c) 스펀들회전에 의한 연마

그림 15 연마제를 이용한 버제거 공정의 예

녹이는 방법과 작은 밀폐된 공간 내에서의 폭발에 의한 열충격으로 버를 제거하는 방법들이 열에 의한 버제거 방법으로 사용되고 있다. 전기적 방법으로는 전기적 저항이나 스파크에 의해서 버를 녹이는 방법이 사용되고 있으며, 화학적 방법으로는 특별히 제작된 용액 내에 담금으로써 버를 침식하여 제거한다. 이 경우는 모재와 함께 침식되기 때문에 일반적으로 버의 두께가 얇은 경우에

사용되며 완전한 버의 제거가 어렵다. 전해액을 이용한 버제거 방법(ECD; electro chemical deburring)은 전해절삭의 원리를 이용하여 버제거가 어려운 위치에 발생한 경우, 즉 그림 12에서 버 'C'와 같은 오일주입 구멍 구멍가공 후 내부에 존재하는 버제거에 효율적으로 사용되고 있다. 그러나 각각의 버에 대한 전용 치구가 필요하기 때문에 경제적인 측면도 고려되어야 한다.

6. 버 관련기술의 역사와 앞으로의 전망

'Burr Technology'란 새로운 용어와 개념은 1974년 미국의 생산공학 분야에서 큰 역할을 하고 있는 SME(society of manufacturing engineers)로부터 처음으로 소개되었다. 당시에 Bendix사에서 일하던 Laroux K. Gillespie에 의해서 "Burr Technology Division"이 SME 내에 설립되었다. 그 이후에 이 기구는 "the Burr, Edge and Surface conditioning Technique(BEST) committee"로 바뀌었고 지금까지 눈부신 활약을 하고 있다. 그는 버가 산업현장과 학계에서 오랫동안 그 중요성에 비해서 관심을 끌지 못했으며, 일반적으로 인식되는 것처럼 간단하고 쉬운 과제가 아니라는 점을 강조하면서 현장과 학계의 협조에 의해서 버 관련기술(burr technology)의 발전을 위한 과제들을 제시하였다. 그는 실제로 1930년부터 버에 관한 방대한 자료들을 조사하였으며 또한 현장에서 얻을 수 있는 많은 기술적인 보고서를 작성하였다.⁽¹⁶⁾ BEST committee의 선구자적인 활약에 힘입어 버 관련기술(burr technology)는 더 이상 소외되지 않는 많은 관심을 끄는 중요한 과제로 되었다. 일본에서도 1978년 the Deburring Technology Committee가 JSPE(Japan Society of Precision Engineering)의 분과위원회로 발족한 3년 후 Japan BEST committee가 설립되었다. 이 BEST-J의 Takazawa를 중심으로 학계와 현장의 긴밀한 접촉으로 활발하게 활동하고 있다.⁽⁷⁾ 또한 독일에서도 Germany's Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation을 중심으로 1976년 첫 Conference를 가졌다.

이들은 서로 긴밀한 유대관계를 가지면서 버 관련기술의 발전을 이끌어 갔다. 현재 International Conference on Deburring and

Surface Conditioning(DSC)을 중심으로 활동하고 있다. 이들의 주된 관심은 버 제거작업 경비의 최소화에 있었기 때문에 다음 사항에 관해서 많은 자료가 확립되었다.

- 버의 발생방지를 위한 기술
- 버의 발생을 최소화하기 위한 기술
- 버의 발생을 수용하는 설계방식
- 버 제거 공정의 개발 및 한계 파악
- 허용 가장자리(edge) 상태의 표준화 개발
- 버 형성 원리에 관한 이해

이제까지의 연구는 버 형성원리 및 최소화 방안과 효율적인 버 제거 공정개발로 나누어진다. 그 중에서도 버 제거에 관한 연구가 대부분이며, 이는 형성된 특정 버의 효율적인 제거를 위한 전용장비 및 공정 개발로서 버의 종류만큼이나 다양하다. 버의 제거작업에 앞서서 버 발생이 억제되는 것이 바람직하지만 버 발생의 필연성을 고려할 때 버 생성의 최소화 방안이 많이 제시되었다. 버 생성의 최소화 방안이나 제거작업이 형성원리의 완전한 이해 위에 이루어진다면 가장 이상적이지만 버형성의 복잡성으로 인해서 완전한 모델이 제시되지 못한 실정이다.

과거에 이루어진 이상의 많은 연구를 바탕으로 최근의 버관련기술에 관한 연구와 앞으로의 방향을 다음과 같이 크게 분류할 수 있다.

6.1 버 형성 원리의 정량적인 이해

버 형성 원리의 충분한 이해를 통해서 버 형성 최소화 방안과 효율적인 버제거에 대한 방안이 바람직하게 주어진다. 피가공물의 물성치(인장강도, 가공경화성, 연성 등)와 가공조건에 의해서 버의 형상과 성질이 결정되기 때문이다. 예를 들면, 표면처리에 의한 버 발생 방어나 버의 크기에 따른 제거방법의 선택이 쉽게 이루어질 수 있다. 그러나 이러한 것들은 버 형성의 정상적인 이해 즉, 실험에 의한 충분한 자료에 의해서도 이루어질 수 있으며 또한 많은 자료들이 이미 확보

되어 있다. 그러나 공장자동화(FA)와 유연성있는 생산방식(FMS)의 발달에 따라서 버 제거 작업의 자동화를 위한 정량적인 버 형성 모델이 점차 필요하리라는 것을 쉽게 예측할 수 있다. 특히, 절삭 가공에서의 버 형성 모델은 절삭 가공의 충분한 이해는 물론 절삭 끝부분에서의 소성변형의 이해와 이를 도와줄 소성변형의 유한요소법(FEM)을 통한 예측 및 이러한 거동을 관찰하기 위한 실험장비 구비 등 많은 어려움을 안고 있다.

6.2 버 제거 작업에서의 숙련자 방식의 개발

이미 개발되어서 사용되고 있는 많은 버 제거 방법을 일단 집대성한 서적^{(1),(6)}들이 버 제거작업에 깊은 관심을 가지고 있는 사람들에게 사용되고 있지만, 좀더 보편적인 사용을 위해서는 컴퓨터를 이용한 버 제거 방법의 선택이 이루어져야 할 것이다. 이러한 선택은 주로 경험에 의존하기 때문에 여러 방법에 관한 자료은행(data bank)이 이루어지지 않으면 안 되는 것은 당연하다. 이 때에 입력으로 주어지는 것은 주로 피가공물의 크기 및 물성치와 발생한 버의 크기 및 발생 위치에 관한 정보가 된다. 인공지능(artificial intelligence)의 발달과 함께 버 제거 공정을 위한 숙련자 방식의 개발이 당면 과제로 되어 있다. 이미 이와 같은 체제를 갖춘 자동화 장비도 시판되고 있다. 좀더 나아가 미래의 컴퓨터로 운영되는 공장을 생각하면, 버제거 공정의 모델을 확립함으로써 모의실험(simulation)을 통한 공정 예측을 통해서 작업시간 및 경비의 절감도 기대할 수 있게 된다.

6.3 버 제거 작업의 자동화

소형 다량의 제품은 베럴회전방법(barrel tumbling)과 같은 대량작업 장비의 자동화에 의해서 효율적으로 처리되고, 라인화되어 있

는 자동화된 공장에서는 가능한한 CNC장비 내에서 버 제거전용 공구에 의해서 버를 제거하여 불필요한 작업을 줄일 수 있다. 그러나 CNC장비에서 제거될 수 없는 경우나 각 공정의 전용화를 위해서 로봇에 의존한 버 제거 작업에 대한 연구가 전세계적으로 한창이다. 로봇은 CNC장비보다 덜 정확하고 강성(stiffness)이 떨어지지만 더 많은 로봇팔의 자유도로써 더 많은 작업이 가능하며 저렴한 가격으로 FMS에서의 버제거단위(deburring cell)을 이룰 수 있다. 절삭가공에서 발생한 버의 가공경화에 의한 특성과 버형성의 불규칙성을 고려할 때, 주로 용접이나 도장용 로봇과 비교하여 다음과 같은 특성이 갖추어져야만 한다.

- 버 제거시의 저항력에 대응하는 로봇 팔의 강성(stiffness)이 있어야 함.
- 균일한 가장자리(edge) 상태를 유지하기 위한 가장자리 형상에 따른 추적 능력이 있어야 한다.
- 설치 오차나 불규칙한 버형상을 보정할 수 있는 공구나 로봇의 기능이 요구된다.

7. 맺음말

버관련기술(burr technology)의 실체와 전세계적인 추세를 이해함으로써 산업현장에서의 기술적, 경제적인 중요성과 학문적인 입장에서의 중요성을 강조하고자 하였다. 버 형성 원리와 버제거작업에 관한 학문적 관심의 결여, 그리고 산업현장에서의 효율적인 버에 대한 대처에 의한 원가절감을 위한 노력의 미흡으로 버관련기술의 수준이 초보적인 단계에 있는 우리나라의 실정을 고려할 때, 점차로 생산방식의 발달로 인해서 다가올 버에 관한 문제점을 연구기관과 산업체간의 긴밀한 협조를 통해서 해결해가야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Gillespie, L.K., et al, 1975, Deburring Capabilities and Limitations, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn.
- (2) Nakayama, K. and Arai, M., 1987, "Burr Formation in Metal Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 36/1, pp. 33~36.
- (3) Ko, S. and Dornfeld, D.A., 1991, "A Study on Burr Formation Mechanism," Trans. ASME, J. of Eng. for Materials and Technology, Vol. 113/1, pp. 75~87.
- (4) Ko, S. and Dornfeld, D.A., 1989, "Analysis and Modeling of Burr Formation and Breakout in Metal," Mechanics of Deburring and Surface Finishing Process, R.J. Stango and P.R. Fitzpatrick, eds., ASME, New York, pp. 79~91.
- (5) Gillespie, L.K. and Blotter, P.K., 1976, "The Formation and Properties of Machining Burrs," Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, pp. 64~74.
- (6) Gillespie, L.K., et al, 1981, Deburring Technology for Improved Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn.
- (7) Takazawa, K., 1985, "The Academic Challenge of Burr Technology in Japan," Conference Proceeding, Deburring and Surface Conditioning '85, SME Technical Report, pp. 5~31 to 5~48. 